



ΤΕΙ Μεσολογίου
Τμήμα Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων και Δικτύων
IEEE Student Branch



«Digital Wireless Communications Techniques»

Διοργάνωση

- IEEE Student Branch ΤΕΣΥΔ
- Ερευνητικό εργαστήριο NeTIA/TSN

Τεχνικές Ψηφιακής Διαμόρφωσης

Δρ. Μιχάλης Παρασκευάς
Επικ. Καθηγητής ΤΕΣΥΔ/ΤΕΙΜΕΣ

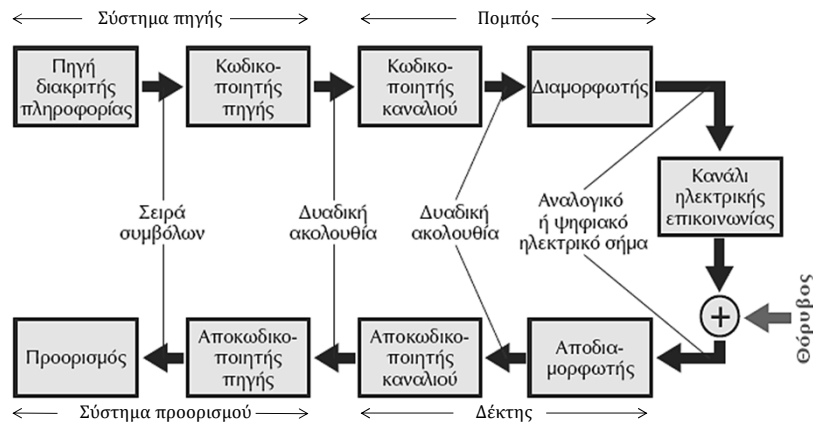
Απρίλιος 2012

Ατζέντα

1. Επισκόπηση Ψηφιακού Συστήματος Επικοινωνίας
2. Το Κανάλι της Επικοινωνίας
3. Μετάδοση Δεδομένων στη Βασική Ζώνη
4. Εισαγωγή στην Έννοια της Διαμόρφωσης
5. Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους ASK (BASK / MASK)
6. Ψηφιακή Διαμόρφωση Φάσης PSK (BSK / MPSK / DEPSK / PDSK / QPSK / DQPSK / $\pi/4$ QPSK / QAM)
7. Ψηφιακή Διαμόρφωση Συχνότητας FSK (BFSK / MFSK / MSK / GMSK)

Επισκόπηση Ψηφιακού Συστήματος Επικοινωνίας

Ψηφιακό Σύστημα Επικοινωνίας



Σκοπός: η διαβίβαση συμβόλων να γίνεται με όσο **υψηλότερο ρυθμό διαβίβασης και πιστότητα**



Πηγή Διακριτής Πληροφορίας

Πηγή διακριτής πληροφορίας: Παράγει **διακριτά σύμβολα**, π.χ. γράμματα.

Παράμετροι λειτουργίας διακριτής πηγής:

- Αλφάβητο πηγής (σύμβολα ή γράμματα)
- Ρυθμός παροχής συμβόλων
- Πιθανότητες αλφαβήτου πηγής
- Πιθανοεξαρτήσεις μεταξύ συμβόλων σε μία ακολουθία

Εντροπία πηγής (H, bits/symbol): Το μέσο πληροφοριακό περιεχόμενο ανά σύμβολο, σε ένα μήνυμα μεγάλου μήκους.

Οι πιθανοεξαρτήσεις μεταξύ των συμβόλων **μειώνουν** την εντροπία

Ρυθμός παροχής πληροφορίας (R, bits/sec): Το γινόμενο της εντροπίας επί τον ρυθμό παραγωγής συμβόλων. Εκφράζει τον ελάχιστο μέσο ρυθμό ψηφιακών δεδομένων για να αναπαρασταθεί η πληροφορία που παράγεται από την διακριτή πηγή.

$$R \text{ (bits/sec)} = H \text{ (bits/symbol)} \times \text{ρυθμός παραγωγής συμβόλων (symbols/sec)}$$



Κωδικοποιητής / Αποκωδικοποιητής Πηγής

Είσοδος: Μια αλυσίδα από σύμβολα, που φθάνουν με ρυθμό r_s symbols/sec

Έξοδος: Δυαδική ακολουθία από 1 και 0, που δημιουργούν καθορισμένες λέξεις ανά λαμβανόμενο σύμβολο ή πακέτο (block) συμβόλων.

Μήκος λέξης (L, bits/symbol): Σταθερό ή μεταβλητό

Ρυθμός εξόδου: $R_C(\text{bits/sec}) = r_s (\text{symbols/sec}) \times L (\text{bits/symbol})$

Άριστος Κωδικοποιητής: Όταν ο ρυθμός δεδομένων εξόδου είναι ίσος με τον ρυθμό παροχής της πηγής ($R_C = R$)

Παράμετροι κωδικοποιητή:

- Μήκος πακέτου (block size)
- Μήκη κωδικών λέξεων
- Μέσος ρυθμός ψηφιακών δεδομένων (data rate)
- Απόδοση κωδικοποιητή, δηλ. το πηλίκο R/R_C

Αποκωδικοποιητής: Μετατρέπει μία δυαδική ακολουθία σε ακολουθία συμβόλων

- **Απλός:** οι κωδικές λέξεις είναι **σταθερού μήκους**
- **Πολύπλοκος:** οι κωδικές λέξεις είναι **μεταβλητού μήκους**



Διαμορφωτής

Είσοδος: Μια ακολουθία δυαδικών συμβόλων

Έξοδος: Μια κυματομορφή κατάλληλη για μετάδοση μέσω του καναλιού

Διαμόρφωση: Ισχυρό εργαλείο που χρησιμοποιείται για:

- Τη μείωση των επιπτώσεων του **θορύβου** του καναλιού.
- Την **προσαρμογή** του φάσματος συχνοτήτων του σήματος, με τα χαρακτηριστικά του καναλιού.
- Να δώσει δυνατότητα **πολυπλεξίας** πολλών σημάτων μαζί.
- Να υπερνικηθούν **περιορισμοί** των συσκευών.

Σημαντικές παράμετροι διαμορφωτή:

1. Τύπος κυματομορφής που χρησιμοποιεί
2. Διάρκεια κυματομορφών
3. Στάθμη ισχύος
4. Εύρος ζώνης συχνοτήτων που χρησιμοποιεί

Αύξηση των 2, 3, 4, οδηγεί σε μείωση του θορύβου.



Αποδιαμορφωτής

Αποδιαμόρφωση : Διαδικασία ανάκτησης του μηνύματος που φέρει η κυματομορφή η οποία παράγεται από τον διαμορφωτή.

Για δοσμένο τύπο διαμορφωτή, το σπουδαιότερο χαρακτηριστικό είναι η **μέθοδος αποδιαμόρφωσης**.

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία διαθέσιμων τεχνικών αποδιαμόρφωσης.

Μπορούμε να συνάγουμε σχέσεις μεταξύ του ρυθμού ψηφιακών δεδομένων, απαιτήσεων σε ισχύ και εύρος ζώνης, αν γνωρίζουμε:

- Τον τύπο και τη διάρκεια της κυματομορφής που παράγει ο διαμορφωτής
- Τα φυσικά χαρακτηριστικά του καναλιού και του θορύβου του
- Τον τύπο της αποδιαμόρφωσης

Χαρακτηριστικά διαμορφωτή / αποδιαμορφωτή ορίζουν τον μέσο ρυθμό σφαλμάτων.



Κωδικοποιητής / Αποκωδικοποιητής Καναλιού

Κωδικοποιητής Καναλιού: Χρησιμοποιείται για τη μετάδοση υψηλής απόδοσης και αξιοπιστίας. Συνήθως επιλέγονται λίγα, π.χ. δύο, αναλογικά σήματα για την μετάδοση μέσα από το κανάλι. Πρόσθετα bits ελέγχου χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και διόρθωση λαθών.

Μέθοδοι κωδικοποίησης:

- Κατά μπλοκ : k bits πληροφορίας + r bits ελέγχου
- Συγκεραστική : bits πληροφορίας + bits ελέγχου αναμινύονται

Σημαντικά χαρακτηριστικά κωδικοποιητή καναλιού:

- Μέθοδος κωδικοποίησης
- **Απόδοση κώδικα** (= ρυθμός δεδομένων εισόδου / ρυθμός δεδομένων εξόδου)
- Ικανότητα για έλεγχο του σφάλματος
- Πολυπλοκότητα

Αποκωδικοποιητής καναλιού: Ξαναβρίσκει τα bits που μεταφέρουν την πληροφορία από την κωδικοποιημένη δυαδική ακολουθία.

Σημαντικά χαρακτηριστικά αποκωδικοποιητή καναλιού:

- Πολυπλοκότητα
- Χρόνος καθυστέρησης



Κανάλι Επικοινωνίας

Κανάλι Επικοινωνίας: το ηλεκτρικό μέσο, μεταξύ πηγής και προορισμού.

Χαρακτηριστικά καναλιού:

- **Περιορισμένο εύρος ζώνης** συχνοτήτων (φάσμα, Hz) – **Χωρητικότητα C** [απαιτείται $C > R$]
- **Απόσβεση** (απώλειες, εξασθένιση) (Signal to Noise Ratio – S/N)
- **Παραμόρφωση πλάτους και φάσης**
- Εισαγωγή **θορύβου** (Θερμικός προσθετικός λευκός θόρυβος, κρουστικός θόρυβος, παρεμβολές) – Δεν αφαιρείται σε όλες τις περιπτώσεις
- **Πολυδιάδρομη όδευση** (για ασύρματα κανάλια)
- Χρονικές μεταβολές

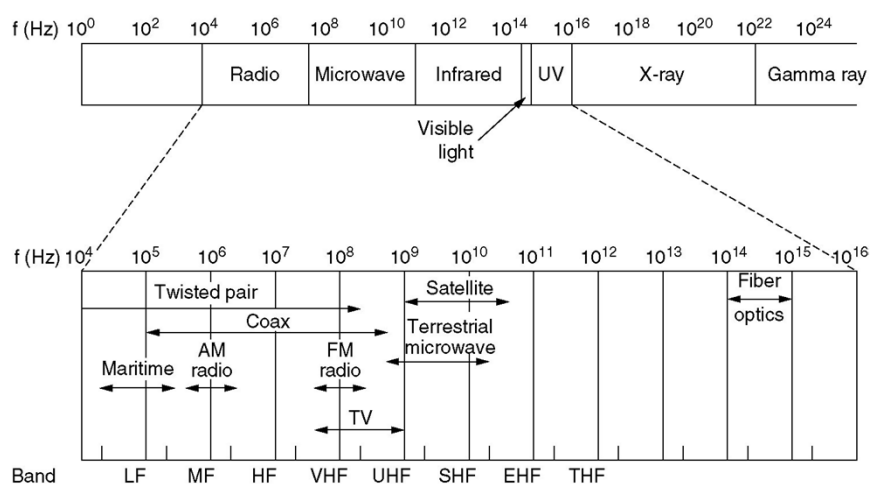
Είδη καναλιών:

- **Κανάλια καθοδηγούμενης μετάδοσης** [συνεστραμμένα ζεύγη συρμάτων, (τηλεφωνία, xDSL), ομοαξονικά καλώδια (CATV), οπτικές ίνες (2×10^{13} Hz)]
- **Κανάλια ελεύθερης μετάδοσης** [ραδιομετάδοση (radio, TV, WLAN), κινητές επικοινωνίες (GSM, UMTS), δορυφορικά]



Το Κανάλι της Επικοινωνίας

Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα



Μέσα Διάδοσης

Προβλήματα που δημιουργεί το κανάλι στο μεταδιδόμενο σήμα :

- Παραμορφώσεις
- Μεταβολές φάσης με τη συχνότητα (διαφορική καθυστέρηση ομάδας)
- Μεταβολές απολαβής με τη συχνότητα
- Μεταβολές απολαβής με τον χρόνο
- Μετατοπίσεις συχνότητας λόγω σφαλμάτων τοπικού ταλαντωτή

Ενσύρματα ή ασύρματα κανάλια

- Τα ενσύρματα γενικά επηρεάζονται «λιγότερο» από τα πιο πάνω προβλήματα
- Τα οπτικά μέσα (fiber optic) έχουν σίγουρα την καλύτερη απόδοση
- Τα ασύρματα μέσα έχουν τα δικά τους πλεονεκτήματα:
 - Δεν χρειάζονται «φυσική» σύνδεση
 - Πιο εύκολη εγκατάσταση
 - Υποστηρίζουν κινητικότητα των χρηστών



Χωρητικότητα Μέσου (Transmission Capacity)

- Κάθε μέσο μπορεί να μεταφέρει δεδομένα με ένα **μέγιστο ρυθμό** (Maximum Data Rate) ο οποίος προσδιορίζεται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του μέσου.
- Κάθε μέσο λειτουργεί σαν ένα LPF φίλτρο με κάποιο **εύρος ζώνης B** (Hz)
- Αν το σήμα που μεταδίδεται έχει **V επίπεδα** (π.χ. για διαδική μετάδοση $V=2$)

Θεώρημα Nyquist [ισχύει για **ιδανικές** συνθήκες, δηλ. **απουσία θορύβου**]:

$$\text{Maximum Data Rate} = 2 B \log_2 V \text{ bits/sec}$$

Αντιπροσωπεύει τον **θεωρητικά μέγιστο** ρυθμό μετάδοσης **απουσία θορύβου**.

Παράδειγμα: Δυαδική μετάδοση $V = 2$ σε κανάλι εύρους ζώνης $B = 10\text{KHz}$

$$\text{Maximum Data Rate} = 2 \cdot 10.000 \log_2 2 = 20.000 \text{ bits/sec}$$



Χωρητικότητα Μέσου (Transmission Capacity)

Θεώρημα Shannon [ισχύει για ενθόρυβα κανάλια]

$$\text{Maximum Data Rate} = B \log_2(1 + S/N) \text{ bits/sec}$$

Όπου S/N (dB) είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο στη λογαριθμική κλίμακα dB

Αντιπροσωπεύει τον **θεωρητικά μέγιστο** ρυθμό μετάδοσης **παρουσία θορύβου**.

Παράδειγμα: Μετάδοση μέσα από ενθόρυβο κανάλι εύρους ζώνης $B=10\text{ KHz}$
και $S/N = 31\text{ dB}$ και $S/N = 63\text{ dB}$

$$1) \text{ Maximum Data Rate} = 10.000 \log_2(1 + 31) = 10.000 \log_2(32) = 50.000 \text{ bits/sec}$$

$$2) \text{ Maximum Data Rate} = 10.000 \log_2(1 + 63) = 10.000 \log_2(64) = 60.000 \text{ bits/sec}$$



Μετάδοση Δεδομένων σε Βασική Ζώνη

Μετάδοση στη Βασική Ζώνη

Σήμα Βασικής Ζώνης (baseband signal): Ένα σήμα του οποίου το φάσμα εκτείνεται από (ή σχεδόν από) το DC μέχρι κάποια πεπερασμένη συχνότητα, συνήθως μερικά MHz.

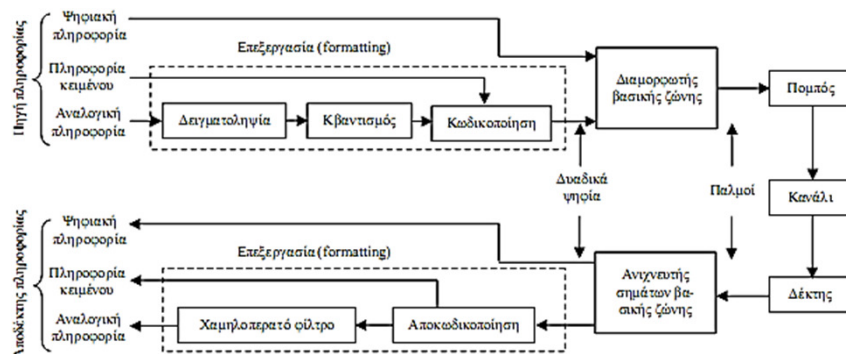
Για τη **μετάδοση** ενός σήματος βασικής ζώνης μέσω τηλεπικοινωνιακού συστήματος:

- Το αναλογικό σήμα υφίσταται **επεξεργασία** (δειγματοληψία + κβαντισμός + κωδικοποίηση) ώστε να παρασταθεί με **ψηφιακά σύμβολα** (δυαδικά ψηφία).
- Κάθε ψηφιακό σύμβολο αντιστοιχίζεται σε μια συγκεκριμένη μορφή παλμού (pulse waveform). Η διαδικασία αυτή καλείται **διαμόρφωση παλμών** (pulse modulation) ή **διαμόρφωση βασικής ζώνης** (baseband modulation).

Παρατηρήσεις:

- Τα σήματα βασικής ζώνης δεν είναι κατάλληλα για μετάδοση σε οποιοδήποτε κανάλι.
- Σήματα βασικής ζώνης των οποίων το φάσμα έχει μεταφερθεί σε μια συχνοτική περιοχή που είναι πιο κατάλληλη για μετάδοση μέσα από ένα συγκεκριμένο κανάλι μετάδοσης ονομάζονται **σήματα διέλευσης ζώνης** (bandpass signals).
- Το φάσμα των σημάτων αυτών είναι συγκεντρωμένο γύρω από μια συχνότητα που καλείται **φέρουσα συχνότητα** (carrier frequency).

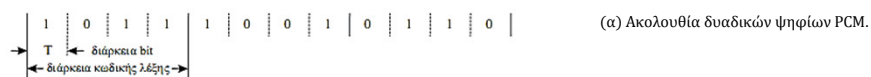
Συστήματα Βασικής Ζώνης



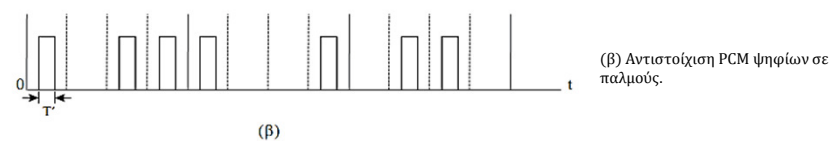
Η ακολουθία δυαδικών ψηφίων (PCM) μεταδίδεται μέσω του καναλιού βασικής ζώνης (συνεστραμμένο ζεύγος καλωδίων ή ομοαξονικό καλώδιο), αφού μετατραπεί σε **παλμοσειρά**, που είναι η συμβατή μορφή κυματομορφής για κανάλια βασικής ζώνης.



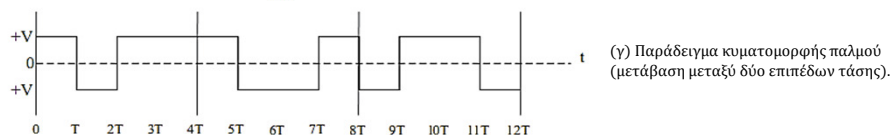
Αναπαράσταση δυαδικών ψηφίων με παλμούς



(α)



(β)



(γ)

- Δέκτης: πρέπει να **ανιχνεύσει** την παρουσία ή απουσία παλμού.
- Η πιθανότητα σωστής ανίχνευσης εξαρτάται από την **ενέργεια** του παλμού και μεγιστοποιείται για διάρκεια του παλμού ίση με T .



Κωδικοποίηση Γραμμής

Βασικότερες **κατηγορίες κωδικοποίησης γραμμής** (line codes):

- **Πολική** (polar): στη διάρκεια ενός bit αποστέλλεται ένας παλμός ή το αρνητικό ενός παλμού.
- **Μονοπολική** (Unipolar): στη διάρκεια ενός bit αποστέλλεται ένας παλμός ή το μηδέν (απουσία παλμού).
- **Διπολική** (Bipolar): χρησιμοποιούνται τρεις στάθμες πλάτους, η μηδενική για το δυαδικό "0", ενώ το δυαδικό "1" απεικονίζεται με δύο στάθμες ίσου πλάτους, εναλλάξ μία θετική και μία αρνητική.

Βασικότερα **είδη παλμών σηματοδότησης**:

- **Nonreturn-to-zero** (NRZ): ο παλμός διαρκεί καθ' όλη την περίοδο του bit
- **Return-to-zero** (RZ): ο παλμός έχει διάρκεια ίση με τη μισή περίοδο του bit
- **Διαχωρισμένης φάσης** (Phase encoded): αποστέλλεται ένας 2-φ παλμός
- **Multilevel binary**



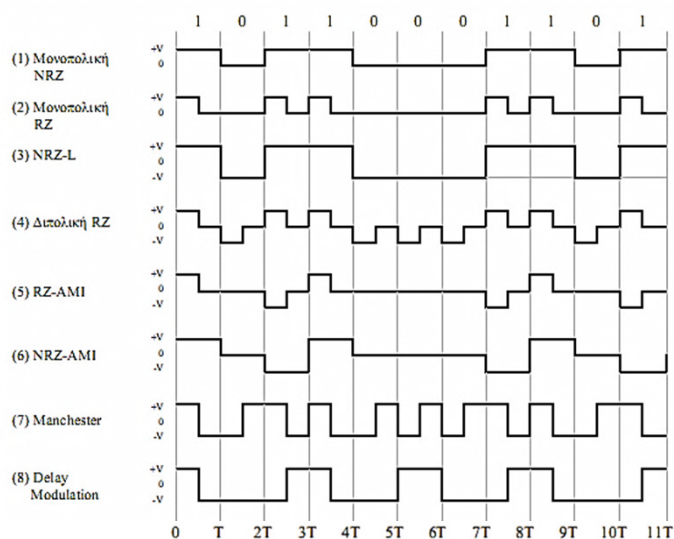
Κριτήρια Επιλογής

Κατηγορίες κωδικοποίησης + είδη παλμών σηματοδότησης = κωδικοποιήσεις γραμμής

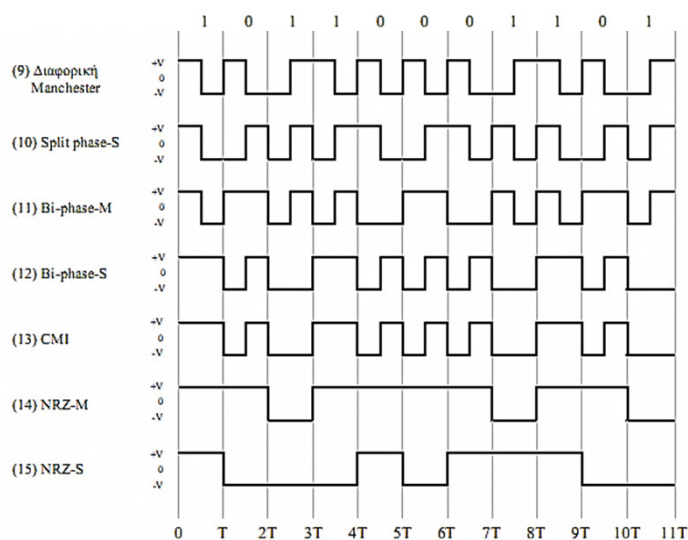
1. **DC συνιστώσα**: Για κανάλια με χαμηλή απόκριση στις χαμηλές συχνότητες (π.χ. τηλεφωνικό κανάλι) είναι επιθυμητή η απουσία dc συνιστώσας.
2. **Συγχρονισμός**: Ο συγχρονισμός bit ή συμβόλου είναι πολύ σημαντικός για οποιοδήποτε ψηφιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα.
3. **Ανίχνευση σφαλμάτων**: Ορισμένες κωδικοποιήσεις παρέχουν τρόπους ανίχνευσης σφαλμάτων χωρίς την εισαγωγή επιπλέον bits στην ακολουθία δεδομένων.
4. **Εύρος ζώνης**: Συγκεκριμένες κωδικοποιήσεις (π.χ. κωδικοποιήσεις πολλαπλών επιπέδων), αυξάνουν την φασματική απόδοση και επιτρέπουν τη μείωση του απαιτούμενου εύρους ζώνης για ένα δεδομένο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων.
5. **Διαφορική κωδικοποίηση**: Οποιαδήποτε αντιστροφή της πολικότητας της κυματομορφής δεν επηρεάζει την ανίχνευση των δεδομένων.
6. **Ανοσία στο θόρυβο**: Ένα βασικό κριτήριο επιλογής μιας PCM κυματομορφής είναι και η ανοσία της στο θόρυβο, που εκφράζεται μέσω της πιθανότητας σφάλματος.



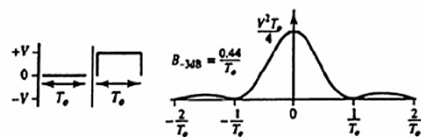
Κωδικοποιήσεις Γραμμής



Κωδικοποιήσεις Γραμμής



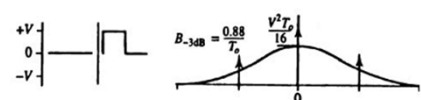
Κωδικοποίηση Τετραγωνικών Κυματομορφών



- **Μονοπολική με μη-επαναφορά στο μηδέν (NRZ)**

0 = δεν αποστέλλεται παλμός

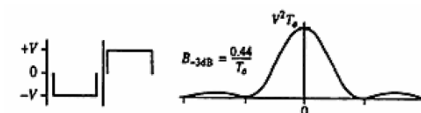
1 = παλμός σταθερής τάσης



- **Μονοπολική με επαναφορά στο μηδέν (RZ)**

0 = δεν αποστέλλεται παλμός

1 = παλμός που επιστρέφει το μηδέν πριν το τέλος της διάρκειας του ψηφίου



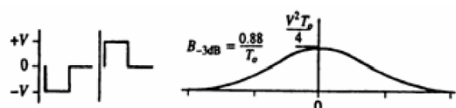
- **Διπολική με μη-επαναφορά στο μηδέν**

1 = παλμός θετικής σταθερής τάσης

0 = παλμός αρνητικής σταθερής τάσης

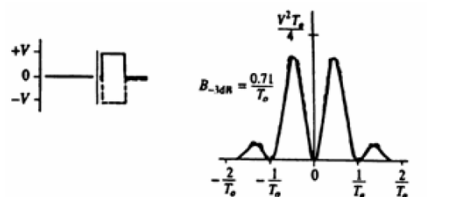


Κωδικοποίηση Τετραγωνικών Κυματομορφών



- **Διπολική με επαναφορά στο μηδέν (NRZ)**

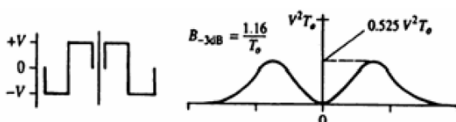
Παλμοί με εναλλακτικά θετική και αρνητική πολικότητα



- **Αντίστροφη εναλλασσόμενου σημείου με επαναφορά στο μηδέν**

0 = θετικοί και αρνητικοί παλμοί σε εναλλαγή

1 = παλμός που επιστρέφει το μηδέν πριν το τέλος της διάρκειας του ψηφίου



- **Κωδικοποίηση Manchester**

1 = θετικός παλμός στο πρώτο μισό,

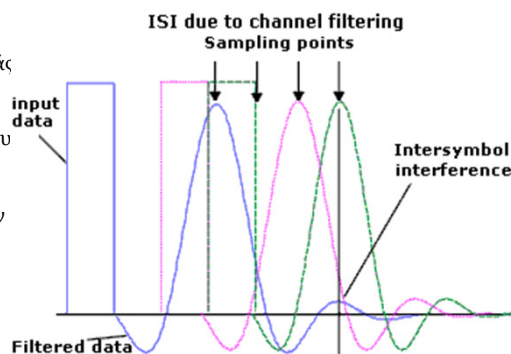
αρνητικός στο δεύτερο μισό

0 = διαμετρικά αντίθετος



Διασυμβολική Παρεμβολή

- Η **διασπορά** (λόγω του πεπερασμένου εύρους ζώνης είτε του μέσου διάδοσης είτε των διατάξεων του πομπού και του δέκτη) των διαδοχικών συμβόλων έχει ως αποτέλεσμα την **επικάλυψη** μέρους της ενέργειας του ενός με τα γειτονικά του.
- Η διασυμβολική παρεμβολή υποβαθμίζει σοβαρά την ικανότητα του ανιχνευτή δεδομένων στο δέκτη να διαχωρίσει το τρέχον σύμβολο από τα γειτονικά του λόγω της διασποράς της ενέργειας αυτών.
- Έτσι, ακόμη και στην περίπτωση που δεν έχουμε θόρυβο σε ένα κανάλι επικοινωνίας, η διασυμβολική παρεμβολή μπορεί να οδηγήσει στην λανθασμένη ανίχνευση συμβόλων, έχοντας ως αποτέλεσμα τον **αναπόφευκτο ρυθμό σφαλμάτων**.

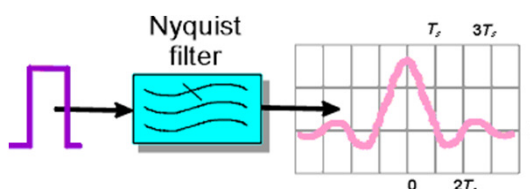
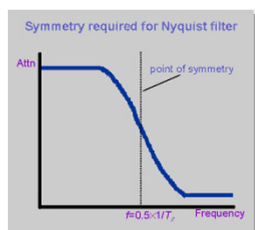


Φίλτρα Nyquist

Το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής είναι δυνατόν να περιοριστεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε να μην υποβαθμίζει την ποιότητα της ζεύξης αναφορικά στον παρατηρούμενο ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων.

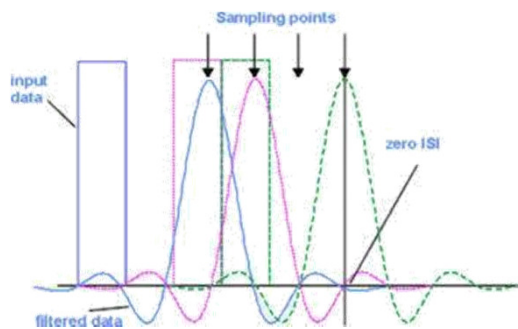
Αποδεικνύεται ότι εάν η **συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού επικοινωνίας** (συμπεριλαμβανομένου του πομπού, μέσου μετάδοσης και δέκτη) είναι σύμφωνη κατά το **κριτήριο Nyquist**, τότε η διασυμβολική παρεμβολή μηδενίζεται.

Η χαρακτηριστική ιδιότητα της συνάρτησης μεταφοράς κατά Nyquist είναι ότι η **ζώνη μετάβασης** μεταξύ των ζωνών διέλευσης και αποκοπής είναι **συμμετρική** περί την συχνότητα $f_s = 1/2T_s$.



Διασυμβολική Παρεμβολή

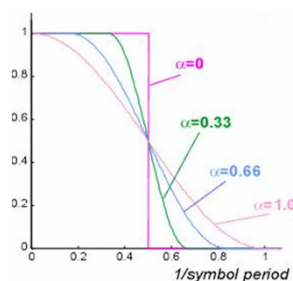
- Διενεργώντας τη διαδικασία της δειγματοληψίας των δεδομένων τις χρονικές εκείνες στιγμές που η διασυμβολική παρεμβολή **διέρχεται δια του μηδενός**, η ενέργεια διασποράς των γειτονικών συμβόλων δεν επηρεάζει την τιμή του τρέχοντος συμβόλου τη στιγμή της δειγματοληψίας.
- Αυτό απαιτεί πολύ **ακριβή χρονισμό δειγματοληψίας** στο δέκτη.



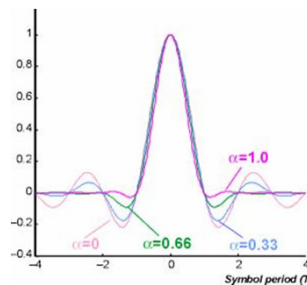
Επίτευξη μηδενικής διασυμβολικής παρεμβολής με φίλτρο Nyquist.

Φίλτρα υψωμένου συνημιτόνου

- Τα φίλτρα **υψωμένου συνημιτόνου** αποτελούν μια δημοφιλή υλοποίηση των φίλτρων Nyquist.
- Ονομάζονται έτσι επειδή το σχήμα της ζώνης μετάβασης μοιάζει με τμήμα της κυματομορφής ενός συνημιτόνου. Η οξύτητα του φίλτρου ελέγχεται από τον **παράγοντα κλίσης** του φίλτρου α .
- Εύρος Ζώνης Συχνότητων $B = \frac{1}{2T_s}(1 + \alpha)$



Απόκριση συχνότητας



Κρουστική απόκριση

Εισαγωγή στην Έννοια της Διαμόρφωσης

Η Ανάγκη για Διαμόρφωση

Διαμόρφωση: Η συστηματική μεταβολή κάποιου χαρακτηριστικού της φέρουσας κυματομορφής, όπως π.χ. πλάτος, συχνότητα, φάση, σύμφωνα με μία συνάρτηση του πληροφοριακού σήματος (μήνυμα).

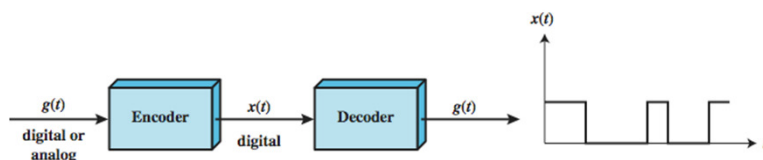
- **Εύκολη ακτινοβολία:** Για την αποτελεσματική εκπομπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στον ελεύθερο χώρο, οι διαστάσεις της κεραίας πρέπει να είναι **συγκρίσιμες** με το μήκος κύματος (λ) του σήματος.

$$\text{Ισχύει } \lambda = c/f \text{ όπου } c = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$$

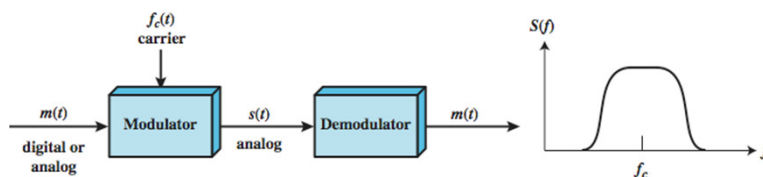
$$\text{Άρα για } f = 300 \text{ Hz} \Rightarrow \lambda = 10^6 \text{ m} \text{ ενώ για } f = 300 \text{ MHz} \Rightarrow \lambda = 1 \text{ m}$$

- **Πολυπλεξία:** για τη μεταφορά των φασμάτων πολλών σημάτων σε διαφορετικές φασματικές περιοχές και την **ταυτόχρονη** μετάδοσή τους μέσα από το ίδιο κανάλι.
- **Υπέρβαση περιορισμών από τις διατάξεις:** μεταφέροντας το φάσμα του σήματος σε φασματική περιοχή που προσφέρει **ευνοϊκότερες συνθήκες σχεδίασης** των διατάξεων.
- **Εκχώρηση συχνότητας:** για την ραδιοφωνική ή τηλεοπτική εκπομπή σε **συγκεκριμένη** φασματική περιοχή ανά σταθμό.
- **Περιορισμό θορύβου και παρεμβολών:** Μπορούμε να επιτύχουμε περιορισμό του θορύβου μετάδοσης **ανταλλάσσοντας** ευρύτερο φάσμα.

Τεχνικές Κωδικοποίησης και Διαμόρφωσης



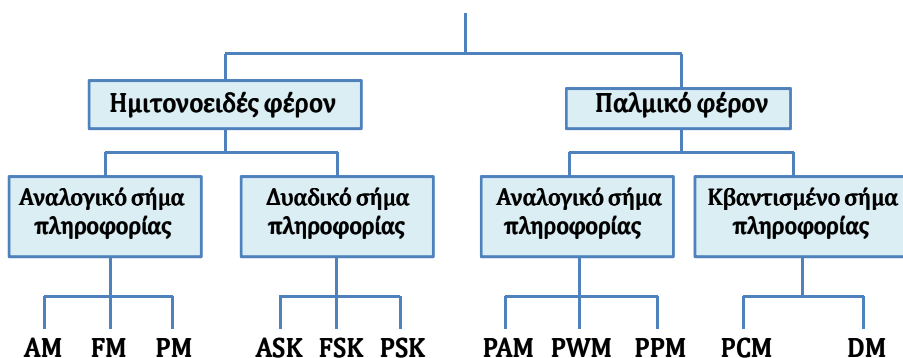
(a) Encoding onto a digital signal



(b) Modulation onto an analog signal



Είδη Διαμόρφωσης



A=Amplitude, F=Frequency, P=Phase, M= Modulation

K=Keying

W=Width, P=Pulse, Position

D=Delta

A. Διαμόρφωση με Ημιτονοειδές Φέρον

A1. Αναλογική διαμόρφωση συνεχούς κύματος

Σήμα πληροφορίας $m(t)$ συνεχούς χρόνου Ημιτονοειδές φέρον $x(t) = A_c \cos \omega_c t$

Διαμορφωμένο σήμα $x_c(t) = A(t) \cos[\omega_c t + \varphi(t)]$, $\omega_c = 2\pi f_c$

- Διαμόρφωση πλάτους ή γραμμική (AM) αν $A(t)$ συνδέεται γραμμικά με $m(t)$
- Διαμόρφωση συχνότητας (FM) αν $\varphi'(t)$ συνδέεται γραμμικά με $m(t)$
- Διαμόρφωση φάσης (PM) αν $\varphi(t)$ συνδέεται γραμμικά με $m(t)$

A2. Ψηφιακή διαμόρφωση συνεχούς κύματος ή ψηφιακή διαμόρφωση φέροντος

Σήμα πληροφορίας $m(t)$ ακολουθία παλμών Ημιτονοειδές φέρον $x(t) = A_c \cos \omega_c t$

- Ψηφιακή διαμόρφωση πλάτους ή κλείδωμα μεταλλαγής πλάτους (ASK)
- Ψηφιακή διαμόρφωση συχνότητας ή κλείδωμα μεταλλαγής συχνότητας (FSK)
- Ψηφιακή διαμόρφωση φάσης ή κλείδωμα μεταλλαγής φάσης (PSK)



B. Διαμόρφωση με Παλμικό Φέρον

B1. Αναλογική διαμόρφωση παλμών (Analog pulse modulation)

- Το φέρον είναι μία ακολουθία παλμών
- Διαμόρφωση ύψους παλμών (PAM – Pulse Amplitude Modulation)
- Διαμόρφωση διάρκειας παλμών (PWM – Pulse Width Modulation)
- Διαμόρφωση θέσης παλμών (PPM – Pulse Position Modulation)

B2. Ψηφιακή διαμόρφωση παλμών (Digital Pulse Modulation)

- Το σήμα πληροφορίας είναι μια ακολουθία **δυναμικών** παλμών
- Παλμοκωδική Διαμόρφωση (PCM – Pulse Code Modulation)
 - A/D μετατροπή: Δειγματοληψία, κβαντισμός και κωδικοποίηση
 - Σφάλματα δειγματοληψίας και κβαντισμού



A1. Αναλογική Διαμόρφωση

Χρησιμοποιείται για την μετάδοση ενός πληροφοριακού σήματος $m(t)$ **συνεχούς χρόνου** (αναλογικό) μέσα από ένα δοσμένο κανάλι επικοινωνίας.

Συνήθως το σήμα $m(t)$ είναι χαμηλών συχνοτήτων και πεπερασμένης ενέργειας.

- Για **κανάλι διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων**, τότε το πληροφοριακό σήμα $m(t)$ μπορεί να διαβιβαστεί χωρίς διαμόρφωση, δηλ. σε **μετάδοση βασικής ζώνης**.
- Για **κανάλι διέλευσης περιοχής συχνοτήτων**, τότε το πληροφοριακό σήμα $m(t)$ πρέπει να **διαμορφωθεί** ώστε να μεταφερθεί στην περιοχή συχνοτήτων του καναλιού και να διαβιβαστεί.

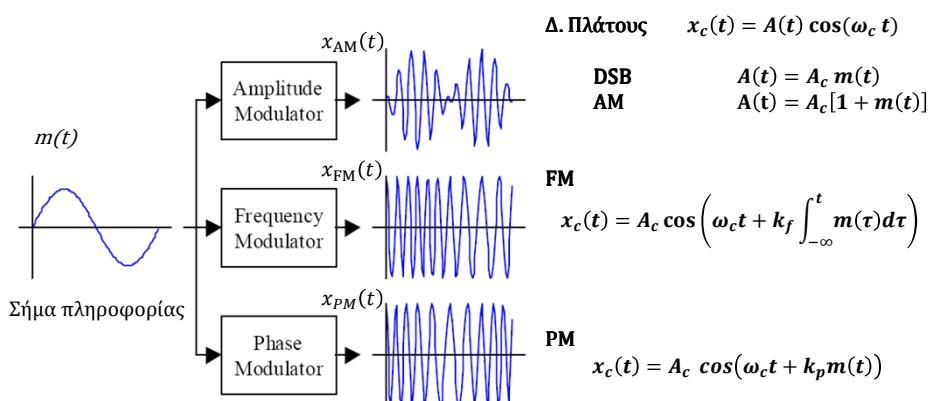
Σήμα πληροφορίας $m(t)$ **συνεχούς χρόνου**

Ημιτονοειδές φέρον $x(t) = A_c \cos \omega_c t$

Διαμορφωμένο σήμα $x_c(t) = A(t) \cos[\omega_c t + \varphi(t)], \quad \omega_c = 2\pi f_c$



Βασικοί Τύποι Αναλογικής Διαμόρφωσης



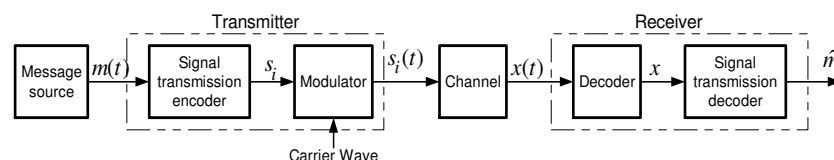
A2. Ψηφιακή Διαμόρφωση

Χρησιμοποιείται για την μετάδοση ενός πληροφοριακού σήματος $m(t)$ ακολουθίας παλμών (ψηφιακό) μέσα από ένα δοσμένο κανάλι επικοινωνίας.

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε **μετάδοση βασικής ζώνης**, αλλά τα περισσότερα κανάλια έχουν **φτωχή απόκριση** στις χαμηλές συχνότητες.

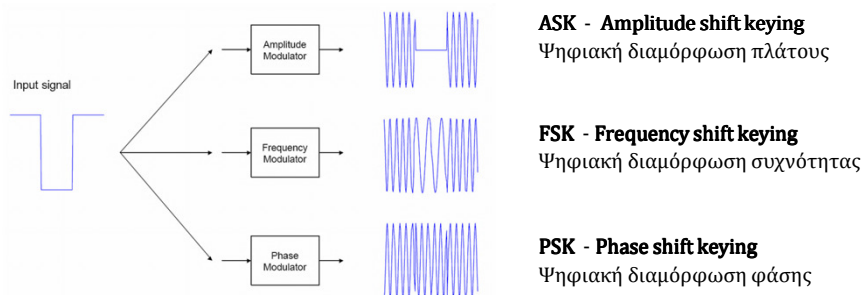
Επομένως, **διαμορφώνουμε** κατάλληλα το ψηφιακό σήμα $m(t)$ ώστε να το μεταφέρουμε στην επιθυμητή ζώνη διέλευσης συχνοτήτων του καναλιού. Η ψηφιακή πληροφορία $m(t)$ μπορεί να μεταβάλλει το **πλάτος**, τη **φάση** ή τη **συχνότητα** του **φέροντος**.

Σήμα πληροφορίας $m(t)$ ακολουθία παλμών
 Ημιτονοειδές φέρον $x(t) = A \cos \omega_c t$



Μέθοδοι Ψηφιακής Διαμόρφωσης

Στην ψηφιακή διαμόρφωση στέλνουμε bits με τη χρήση ενός υψίσυχνου φέροντος σήματος $x(t) = A \cos \omega_c t$. Κάθε bit διαρκεί T και ο ρυθμός μετάδοσης είναι $r=1/T$



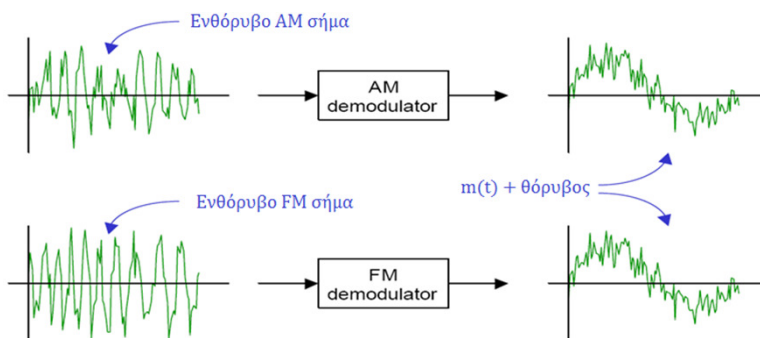
- Για Δυαδικά (Binary) σήματα ($M = 2$), έχουμε:
 - Binary Amplitude Shift Keying (BASK)
 - Binary Frequency Shift Keying (BFSK)
 - Binary Phase Shift Keying (BPSK)
- Για $M > 2$ έχουμε τις Μιαδικές τεχνικές π.χ. M _ary Phase Shift Keying (MPSK)



Σύγκριση Αναλογικών Ψηφιακών Διαμορφώσεων

Αναλογική διαμόρφωση

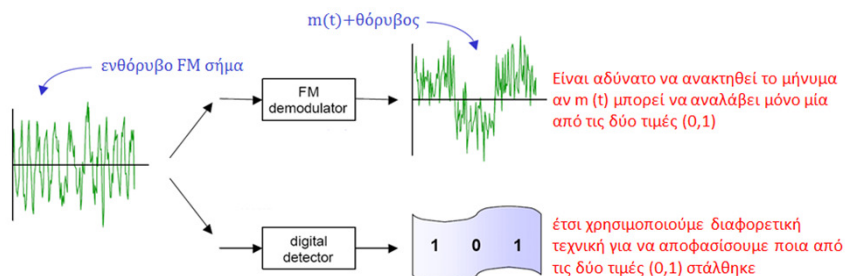
1. Το σήμα $m(t)$ είναι αναλογικό
2. Ο αποδιαμορφωτής πρέπει να αναπαραγάγει το $m(t)$ όσο καλύτερα μπορεί



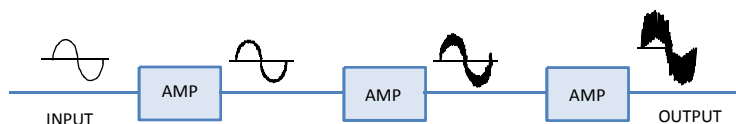
Σύγκριση Αναλογικών Ψηφιακών Διαμορφώσεων

Ψηφιακή διαμόρφωση

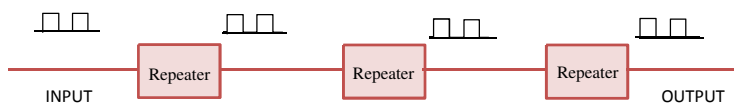
1. Το $m(t)$ παίρνει μια τιμή από ένα πεπερασμένο σύνολο τιμών
2. Ο αποδιαμορφωτής πρέπει να αποφασίσει ποιά από τις πιθανές τιμές έχει μεταδοθεί. Δεν υπάρχει ανάγκη πιστής αναπαραγωγής του $m(t)$



Γιατί Ψηφιακά Συστήματα;



Αναλογικοί επαναλήπτες (ενισχυτές): Ο θόρυβος **συσσωρεύεται**



Ψηφιακοί επαναλήπτες: «Τέλεια» αναπαραγωγή του σήματος

Σύγκριση αποδιαμορφωτών {AM, FM, PM} και {ASK, FSK, PSK}

Οι αποδιαμορφωτές για AM, FM και PM:

- Αναπαράγουν πιστά το $m(t)$ από το διαμορφωμένο φέρον
- Κριτήριο επιτυχίας: **η σηματοθορυβική σχέση SNR**

$$s(t) + n(t) \rightarrow \text{Αποδιαμορφωτής} \rightarrow m(t) + n_{\text{out}}(t) \quad SNR = \frac{E\{|m(t)|^2\}}{E\{|n_{\text{out}}(t)|^2\}}$$

Οι αποδιαμορφωτές για ASK, FSK και PSK:

- Αποφασίζουν για ποιά από τις M δυνατές κυματομορφές έχει μεταδοθεί
- Έχουν σαν έξοδο τον κωδικό της κυματομορφής αυτής
- Κριτήριο επιτυχίας = **η μικρή πιθανότητα σφάλματος**

$$s(t) + n(t) \rightarrow \begin{array}{|c|} \hline \text{Επιλογή} \\ \text{πιθανότερης} \\ \text{κυματομορφής} \\ \hline \end{array} \rightarrow \begin{array}{|c|} \hline \text{υπολογισμός} \\ \text{κωδικού} \\ \text{κυματομορφής} \\ \hline \end{array} \rightarrow \mathbf{b}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_{\log_2(M)-1} \end{bmatrix} \quad P(E) = \Pr\{\mathbf{b}_{\text{out}} \neq \mathbf{b}_{\text{transmitted}}\}$$

Κριτήρια Επιδόσεων

- **Αναλογικά Συστήματα Επικοινωνίας**
 - Κριτήριο είναι η πιστότητα της μετάδοσης
 - Στόχος: λαμβανόμενο = εκπεμπόμενο σήμα
- **Ψηφιακά Συστήματα Επικοινωνίας**
 - Κριτήρια είναι ο **ρυθμός μετάδοσης** (R bits/sec) και η **πιθανότητα σφάλματος** ενός bit ($P_b = p(b_r \neq b_t)$)
 - Με ιδανικό κανάλι και χωρίς θόρυβο δεν έχουμε σφάλματα
 - Με θόρυβο, η P_b εξαρτάται από τη ισχύ του σήματος, την ισχύ του θορύβου, από τον ρυθμό μετάδοσης και τα χαρακτηριστικά του καναλιού (εύρος ζώνης συχνοτήτων, πλάτος, φάση).



Σύγκριση Αναλογικών και Ψηφιακών Συστημάτων Επικοινωνίας

Αναλογικά Συστήματα

- Απλούστερη δομή
- Δυσκολότερη σχεδίαση
- Ελάχιστες δυνατότητες υλοποίησης βέλτιστων διατάξεων
- Δυσκολότερη υλοποίηση και συντήρηση
 - Ανάγκη συνεχών ρυθμίσεων
 - Απαιτήσεις γραμμικότητας εξαρτημάτων
 - Εξάρτηση από τις θερμοκρασιακές μεταβολές των εξαρτημάτων
 - Εξάρτηση από τη γήρανση του υλικού
- Χρησιμοποιούνται για υλοποίηση συστημάτων πολύ υψηλών ταχυτήτων ή πολύ μικρής κατανάλωσης

Ψηφιακά Συστήματα

- Μεγαλύτερη αντοχή στο θόρυβο
- Συμπίεση δεδομένων
- Μείωση κόστους
- Βελτίωση Ασφάλειας
- Μικρότερη απαιτούμενη ισχύς
- Πολυπλοκότερη δομή
- Ευκολότερη σχεδίαση
- Δυνατότητα υλοποίησης βέλτιστων διατάξεων
- Καλύτερη προσαρμογή προς το κανάλι
- Ευελιξία κατασκευής
 - DSPs, μPs
 - FPGAs, ASICs
- Μικρότερο κόστος

Ψηφιακές Διαμορφώσεις

- **ASK** (BASK / MASK)
- **PSK** (BSK / MPSK / DEPSK / PDSK / QPSK / DQPSK / $\pi/4$ QPSK / QAM)
- **FSK** (BFSK / MFSK / MSK / GMSK)

Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους - ASK

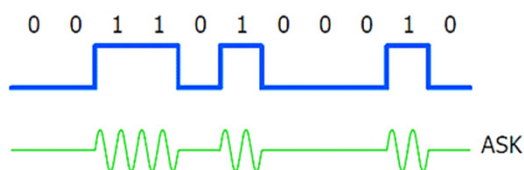
- **ASK** Amplitude Shift Keying
- **BASK** Binary ASK
- **MASK** M/ary ASK

Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους (ASK)

Στο ASK το **πλάτος του φέροντος** μεταπηδά (switched) μεταξύ δύο (ή περισσότερων) επιπέδων, ανάλογα με την ψηφιακή πληροφορία.

Συγκεκριμένα:

- Για bit = **1** στέλνουμε επί χρόνο **T** το σήμα $A \cos \omega_c t$
- Για bit = **0** στέλνουμε επί χρόνο **T** το **μηδέν**



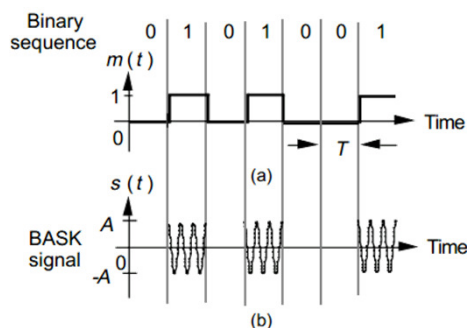
Για **Binary ASK** (BASK, ονομάζεται επίσης **ON-OFF Keying (OOK)**), τα ψηφία 1 και 0 αντιπροσωπεύονται από δύο επίπεδα πλάτους A_I και A_O ή A και $-A$.

Μαθηματική περιγραφή BASK

Σήμα διαμορφωμένο κατά **BASK**:

$$s(t) = m(t) A \cos \omega_c t \quad 0 \leq t \leq T \text{ όπου } m(t) = \{0, 1\} \text{ και } T \text{ η διάρκεια του bit.}$$

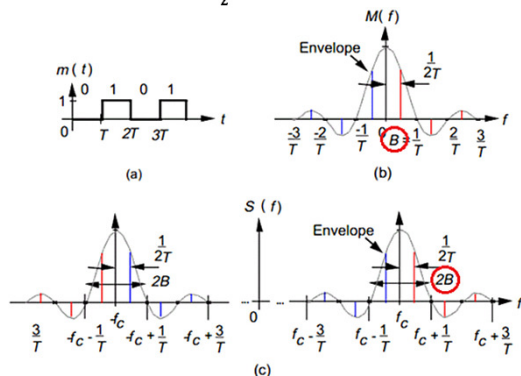
$$\text{Ισχύει } s(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos \omega_c t \quad 0 \leq t \leq T, \text{ όπου } E = P T \text{ η ενέργεια και } P = \frac{A^2}{2} \text{ η ισχύς ενός bit.}$$



(a) Δυναμικό σήμα εισόδου, (b) Διαμορφωμένο κατά BASK σήμα

Φάσμα κατά BASK διαμορφωμένου σήματος

Ο Fourier του σήματος $s(t)$ είναι: $S(f) = \frac{A}{2} [M(f - f_c) + M(f + f_c)]$, όπου $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}$



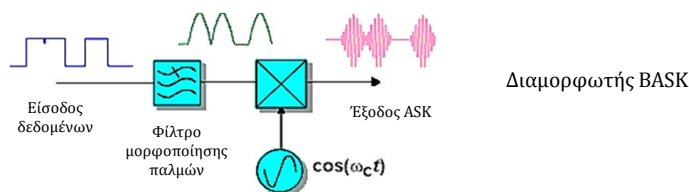
(a) Δυαδικό σήμα εισόδου (b) Φάσμα σήματος εισόδου
(c) Φάσμα διακριτού σήματος διαμορφωμένου κατά BASK
(διπλής πλευρικής ζώνης DSB με φορέα)

Παρατηρούμε ότι η BASK απαιτεί **διπλάσιο εύρος ζώνης** σε σχέση με το αρχικό σήμα.

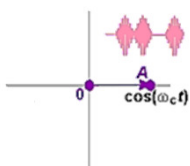


Παραγωγή σήματος BASK

- Φιλτράρισμα του ψηφιακού σήματος εισόδου ώστε να περιοριστεί το εύρος ζώνης και παραγωγή της ακολουθίας δεδομένων βασικής ζώνης.
- Πολλαπλασιασμός φέροντος με την ακολουθία δεδομένων βασικής ζώνης.



Διαμορφωτής BASK



Διάγραμμα αστερισμού ASK

Παρουσιάζει τις καταστάσεις συμβόλων ως προς το πλάτος και τη φάση του διαμορφωμένου φέροντος



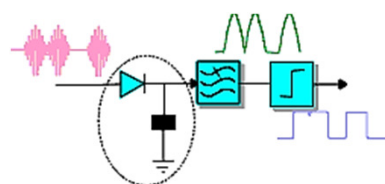
Λήψη σήματος BASK

Ο δέκτης ASK (αλλά και FSK, PSK) «διαβάζει» το διαμορφωμένο σήμα και κάθε T sec «αποφασίζει» αν στο αντίστοιχο διάστημα έλαβε 1 ή 0.

1. Ασύμφωνη ανίχνευση (non-coherent detection)

Η πληροφορία που μεταδίδεται με την ASK μεταφέρεται στην **περιβάλλουσα** (envelope) του διαμορφωμένου σήματος. Έτσι τα δεδομένα μπορούν να ανιχνευθούν χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή (φωρατή) περιβάλλουσας.

Υλοποίηση: χρήση μιας διόδου που λειτουργεί ως ανορθωτής και ενός φίλτρου εξομάλυνσης. Στις ψηλές τιμές έχουμε 1 και στις χαμηλές 0.



Ασύμφωνος αποδιαμορφωτής BASK

- Μειωμένη ικανότητα διαχωρισμού του σήματος από τον θόρυβο.

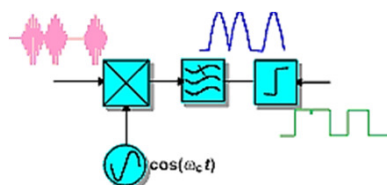
Λήψη σήματος BASK

2. Σύμφωνη ανίχνευση (coherent detection)

Ένας σύμφωνος ανιχνευτής (coherent detector) αναμειγνύει το εισερχόμενο στο δέκτη διαμορφωμένο σήμα με ένα **τοπικό φέρον**, το οποίο δημιουργεί επιλέγοντας την διαφορά από την έξοδο του μίκτη.

Εάν ο τοπικός φορέας είναι **σύμφωνος σε φάση** με το εισερχόμενο σήμα, τότε η έξοδος είναι ανάλογη του εισερχόμενου σήματος και έχουμε **τέλεια ανίχνευση**.

Έξοδος μίκτη: $a(t) \cdot \cos(\omega_c t) \cdot \cos(\omega_c t + \theta) = \frac{1}{2} a(t) \cdot \cos \theta + \frac{1}{2} a(t) \cdot \cos(2\omega_c t + \theta)$

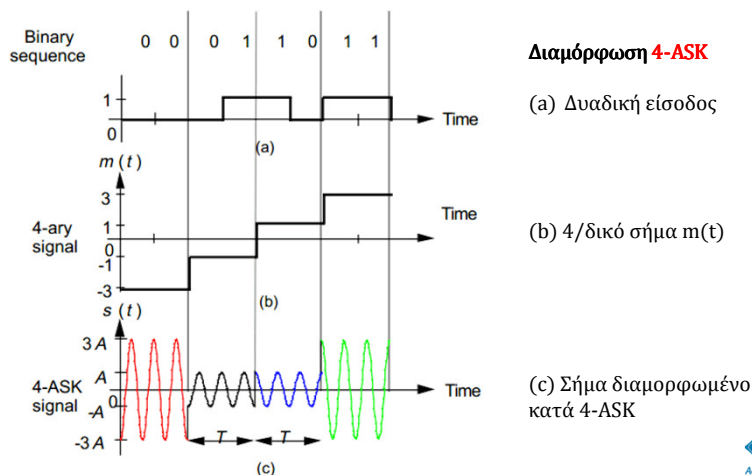


Σύμφωνος αποδιαμορφωτής BASK

Ο τοπικός ταλαντωτής στο δέκτη πρέπει να είναι **κλειδωμένος** ως προς τη φάση με τον τοπικό ταλαντωτή στον πομπό ($\theta=0$). Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται η τεχνική **βρόχου κλειδωμένης φάσης** (phase-locked loop – PLL).

Μαθηματική περιγραφή MASK

Διαμόρφωση ASK **M επιπέδων** (MASK): $s_i(t) = \begin{cases} A_i \cos \omega_c t, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$
 όπου $A_i = A[2i - (M - 1)]$ για $i = 0, 1, \dots, M - 1$ και $M > 4$

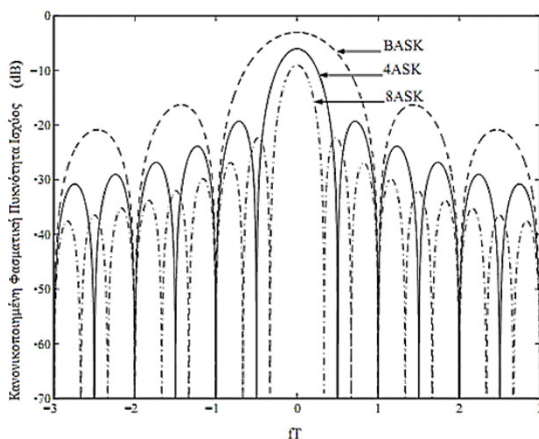


Φασματική πυκνότητα ισχύος σήματος MASK

Φασματική πυκνότητα ισχύος (Power Spectral Density - PSD) [f_c συχνότητα φέροντος]:

$$P(f) = K \frac{T}{M} \left\{ \left[\frac{\sin \pi (f - f_c) m T}{\pi (f - f_c) m T} \right]^2 + \left[\frac{\sin \pi (f + f_c) m T}{\pi (f + f_c) m T} \right]^2 \right\}$$

όπου T η διάρκεια του bit, m το πλήθος των bits/symbol. Ισχύει $M = 2^m$



Φασματική Απόδοση

$$Q = \frac{R}{W} = \frac{R_s \log_2 M}{R_s} =$$

$$= \log_2 M = m \text{ bits/sec/Hz}$$

R ρυθμός μεταφοράς δεδομένων
 W απαιτούμενο εύρος ζώνης
 R_s ρυθμός μετάδοσης συμβόλων

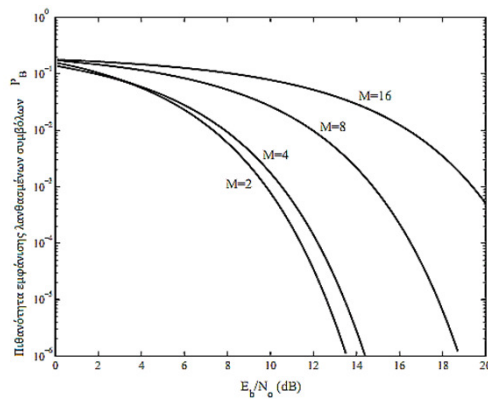
Παρατηρούμε αύξηση της φασματικής απόδοσης Q με την αύξηση των ομαδοποιημένων bits ανά σύμβολο.

Ρυθμός εμφάνισης λαθών σε διαμόρφωση MASK

Ο ρυθμός λήψης λανθασμένων συμβόλων P_S συναρτήσει του λόγου E_b/N_0 δίνεται από:

$$P_S = \frac{M-1}{M} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M^2-1}} \cdot \frac{E_b}{N_0} \right)$$

Όπου E_b η ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια σήματος στην είσοδο του δέκτη στη διάρκεια ενός bit για την επίτευξη συγκεκριμένου ρυθμού σφαλμάτων, παρουσία θορύβου φασματικής πυκνότητας ισχύος N_0 .



Πιθανότητα εμφάνισης λανθασμένων bits P_B

$$P_B = \frac{P_S}{\log_2 M}$$

Η απόδοση ισχύος των ASK είναι **σχετικά χαμηλή** και παρουσιάζουν **μεγάλη ευαισθησία** στις ατέλειες του καναλιού.

Πρακτικά χρησιμοποιείται **μόνο** η BASK.



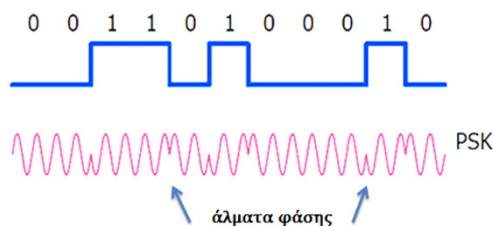
Ψηφιακή Διαμόρφωση Φάσης - PSK

- **PSK** Phase Shift Keying
- **BPSK** Binary PSK
- **MPSK** M/ary PSK
- **DESPK** Differentially Encoded PSK
- **DPSK** Differential PSK
- **QPSK** Quadrature PSK
- **DQPSK** Differential QPSK
- **$\pi/4$ QPSK**
- **QAM** Quadrature Amplitude Modulation

Ψηφιακή Διαμόρφωση Φάσης (PSK)

Στο PSK η **φάση του φέροντος** μεταπηδά μεταξύ δύο (ή περισσότερων) επιπέδων, ανάλογα με την ψηφιακή πληροφορία. Συγκεκριμένα:

- Για bit = **1** στέλνουμε επί χρόνο **T** το σήμα $A \cos \omega_c t$
- Για bit = **0** στέλνουμε επί χρόνο **T** το σήμα $A \cos (\omega_c t + \pi) = -A \cos \omega_c t$



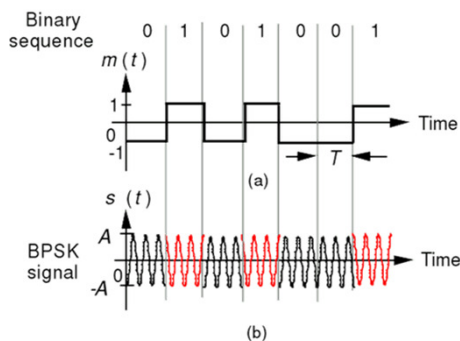
- Η περιβάλλουσα παραμένει **σταθερή**, σε αντίθεση με την ASK.
- Η διαμόρφωση PSK χρησιμοποιείται σε δορυφορικές επικοινωνίες.

Μαθηματική περιγραφή BPSK

Σήμα διαμορφωμένο κατά **BPSK**:

$$s(t) = m(t) A \cos \omega_c t \quad 0 \leq t \leq T \text{ όπου } m(t) = \{-1, 1\} \text{ και } T \text{ η διάρκεια του bit.}$$

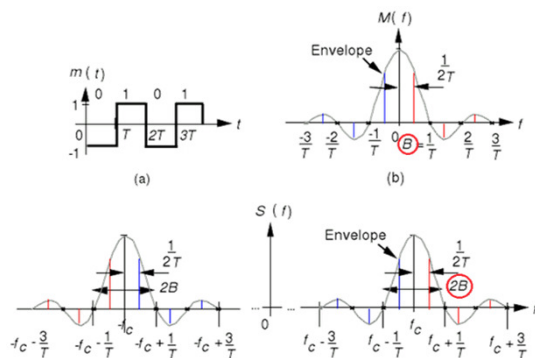
Ισχύει $s(t) = \pm \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos \omega_c t \quad 0 \leq t \leq T$, όπου $E = P T$ η **ενέργεια** και $P = \frac{A^2}{2}$ η **ισχύς** ενός bit.



(a) Δυναμικό σήμα εισόδου, (b) Διαμορφωμένο κατά BPSK σήμα

Φάσμα κατά BPSK διαμορφωμένου σήματος

Ο Fourier του σήματος $s(t)$ είναι: $S(f) = \frac{A}{2} [M(f - f_c) + M(f + f_c)]$, όπου $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}$



(a) Δυαδικό σήμα εισόδου (b) Φάσμα σήματος εισόδου
(c) Φάσμα διακριτού σήματος διαμορφωμένου κατά BPSK
(διπλής πλευρικής ζώνης DSB χωρίς φορέα)

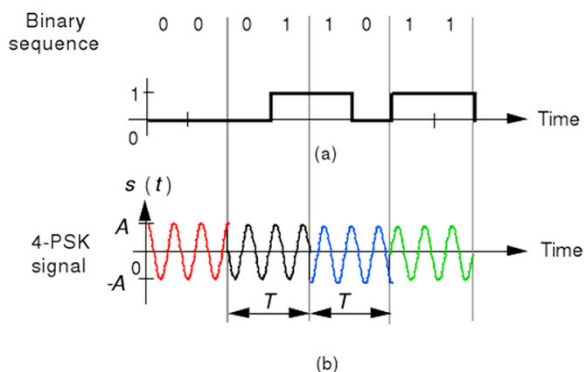
Παρατηρούμε ότι και η BPSK απαιτεί **διπλάσιο εύρος ζώνης** σε σχέση με το αρχικό σήμα.



Μαθηματική περιγραφή MPSK

Διαμόρφωση PSK **M επιπέδων** (MPSK): $s_i(t) = \begin{cases} A \cos(\omega_c t + \theta_i + \theta') & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases}$

όπου $\theta_i = \frac{2\pi}{M} i$ για $i = 0, 1, \dots, M-1$



θ_i	Δυαδικό διάνυσμα
0	0 0 ... 0 0
$2\pi/M$	0 0 ... 0 1
$2(2\pi/M)$	0 0 ... 1 0
...	...
$(M-1)(2\pi/M)$	1 1 ... 1 1

Διαμόρφωση 4-PSK: Δυαδική είσοδος, (b) Σήμα διαμορφωμένο κατά 4-PSK

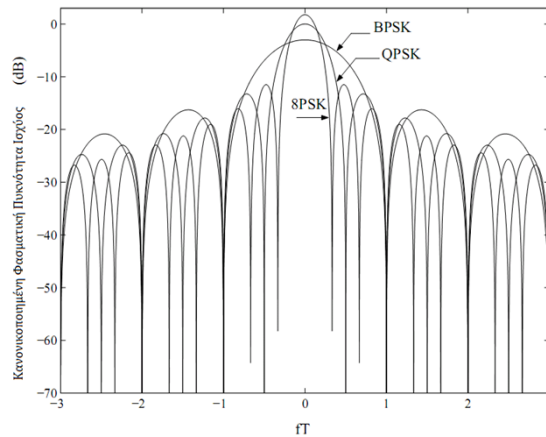


Φασματική πυκνότητα ισχύος σήματος MPSK

Φασματική πυκνότητα ισχύος (Power Spectral Density - PSD) [f_c συχνότητα φέροντος]:

$$P(f) = \frac{mE_b}{2} \left\{ \left[\frac{\sin \pi (f - f_c) mT}{\pi (f - f_c) mT} \right]^2 + \left[\frac{\sin \pi (f + f_c) mT}{\pi (f + f_c) mT} \right]^2 \right\}$$

όπου E_b η ενέργεια ανά bit και m το πλήθος των bits/symbol ($M = 2^m$).



Φασματική Απόδοση

$$Q = \frac{R}{W} = \log_2 M = m \text{ bits/sec/Hz}$$

R ρυθμός μεταφοράς δεδομένων
 W απαιτούμενο εύρος ζώνης

Παρατηρούμε αύξηση της φασματικής απόδοσης Q με την αύξηση των ομαδοποιημένων bits ανά σύμβολο, συνεπώς και με τον αριθμό των συμβόλων M .

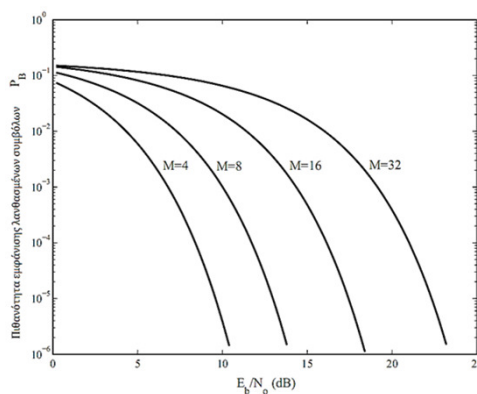


Ρυθμός εμφάνισης λαθών σε διαμόρφωση MPSK

Ο ρυθμός λήψης λανθασμένων συμβόλων P_S συναρτήσει του λόγου E_b/N_0 δίνεται από:

$$P_S = \text{erfc} \left(\sqrt{\log_2 M} \cdot \frac{E_b}{N_0} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{\sqrt{2M}} \right) \right)$$

Όπου E_b η ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια σήματος στην είσοδο του δέκτη στη διάρκεια ενός bit για την επίτευξη συγκεκριμένου ρυθμού σφαλμάτων, παρουσία θορύβου φασματικής πυκνότητας ισχύος N_0 .



Πιθανότητα εμφάνισης λανθασμένων bits P_B

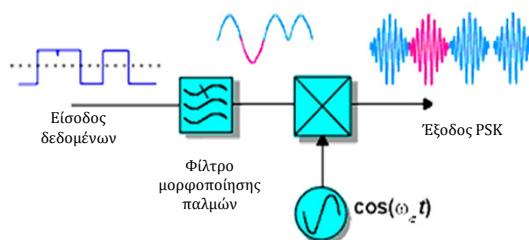
$$P_B = \frac{P_S}{\log_2 M}$$

Για $M > 4$ το σύνολο των μεταδιδόμενων συμβόλων παύει να είναι ορθογωνικό, με αποτέλεσμα η πιθανότητα εμφάνισης λανθασμένων συμβόλων να **αυξάνει** απότομα.



Παραγωγή σήματος BPSK

- Φιλτράρισμα του ψηφιακού σήματος εισόδου ώστε να περιοριστεί το εύρος ζώνης και παραγωγή της ακολουθίας δεδομένων βασικής ζώνης.
- Πολλαπλασιασμός φέροντος με την ακολουθία δεδομένων βασικής ζώνης.

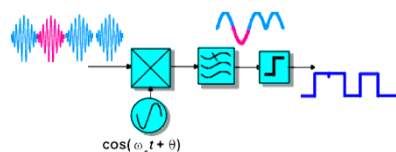


Σχηματικό διάγραμμα διαμορφωτή BPSK

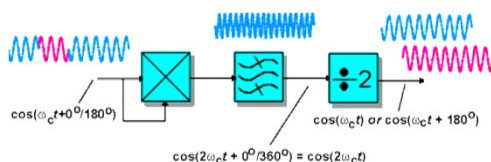
Λήψη σήματος BPSK

Σύμφωνη ανίχνευση (coherent detection): Δεν υπάρχει ασύμφωνος τρόπος ανίχνευσης του σήματος BPSK, αλλά μόνο σύμφωνος.

Ένας ιδανικός ανιχνευτής απαιτεί την **ακριβή γνώση της φάσης** (δηλ. επιθυμητό $\Delta\theta=0$) του αδιαμόρφωτου φέροντα στο δέκτη.



Σύμφωνος αποδιαμορφωτής BPSK



Διάταξη ανάκτησης φέροντος

- Η διαδικασία διαίρεσης συχνότητας εισάγει **αβεβαιότητα 180° στη φάση** του φέροντος.
- Το πρόβλημα λύνεται με την αποστολή μίας **γνωστής ακολουθίας δοκιμής**.
- Σε πραγματικά κανάλια όμως ούτε και αυτό είναι αποδοτικό, αν συμβαίνουν διακοπές στην επικοινωνία.

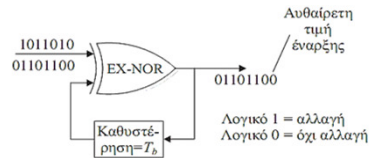
Εναλλακτική λύση:

Διαφορικά Κωδικοποιημένη Ψηφιακή Διαμόρφωση Φάσης (Differentially Encoded PSK – DEPSK).

Διαφορική Κωδικοποίηση Δεδομένων -DEPSK

Η **DEPSK** (Differentially Encoded PSK) αντιμετωπίζει την **αβεβαιότητα ανάκτησης** της φάσης του φέροντος στον δέκτη της PSK.

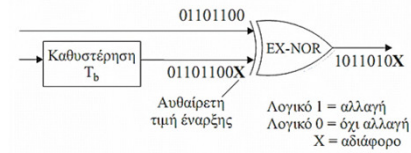
Κωδικοποιητής DEPSK



Μια πύλη **αποκλειστικού OR** μεταφράζει τα δεδομένα εισόδου σε μια κωδικοποιημένη ακολουθία δεδομένων, στην οποία το λογικό **1** στην είσοδο κωδικοποιείται ως **αλλαγή** της λογικής κατάστασης από το **προηγούμενο** κωδικοποιημένο bit και το λογικό 0 στην είσοδο κωδικοποιείται ως μη-αλλαγή κατάστασης.

Η βαθμίδα καθυστέρησης υλοποιείται με έναν χρονιζόμενο καταχωρητή μετατόπισης (shift register) ενός bit.

Αποκωδικοποιητής DEPSK



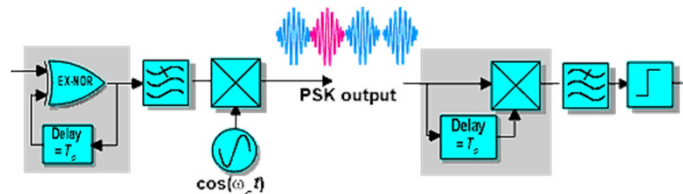
Αν η ανιχνευόμενη ακολουθία δεδομένων **αλλάζει** κατάσταση σε διαδοχικά bit, τότε στην είσοδο υπήρχε ένα λογικό **1**. Αν δεν υπάρχει αλλαγή κατάστασης, τότε συνάγεται ότι θα πρέπει να είχε σταλεί ένα λογικό 0.

Η πληροφορία για την αλλαγή της κατάστασης δεν επηρεάζεται από τυχόν αντιστροφή των δεδομένων και συνεπώς η αβεβαιότητα φάσης του φέροντος δεν επηρεάζει την διαδικασία κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης.



Διαφορική Διαμόρφωση Φάσης - DPSK

- Η **Διαφορική Διαμόρφωση PSK (DPSK)** βελτιώνει την DEPSK ενσωματώνοντας τη λειτουργία της διαφορικής αποκωδικοποίησης στην αποδιαμόρφωση των δεδομένων. Έτσι δεν χρειάζεται μηχανισμό ανάκτησης φέροντος.
- Το τμήμα διαφορικής κωδικοποίησης και ο διαμορφωτής PSK είναι κοινά στις DPSK και DEPSK, αλλά ο δέκτης DPSK λειτουργεί συγκρίνοντας τη φάση του εισερχόμενου συμβόλου του φορέα με αυτήν του προηγούμενου και εκτελεί ταυτόχρονα τη σύμφωνη ανίχνευση και τη διαφορική κωδικοποίηση ως μια λειτουργία.



Διαγράμματα διαμορφωτή και αποδιαμορφωτή DPSK

- Η DPSK χρησιμοποιείται ευρύτατα σε ενσύρματα και ασύρματα modem για σηματοδότηση χαμηλού ρυθμού (έως 4.800 bps) μετάδοσης.
- Η DPSK έχει ελαφρά χειρότερη (μικρότερη) ανοχή στο θόρυβο από την BPSK.



Η έννοια της Ορθογωνικής Σηματοδοσίας

Δύο καταστάσεις συμβόλων $a_i(t)$ και $a_j(t)$ ονομάζονται **ορθογώνιες** στη διάρκεια της περιόδου συμβόλου T_s , όταν ισχύει:

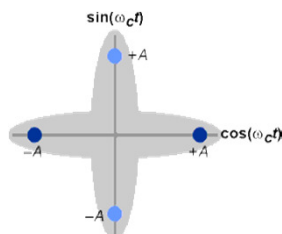
$$\int_0^{T_s} a_i(t) \cdot a_j(t) dt \xrightarrow{i \neq j} 0$$

Με την ορθογωνική σηματοδοσία είναι δυνατό να **αυξήσουμε τον αριθμό των καταστάσεων συμβόλων M** , σε μία ψηφιακή διαμόρφωση, χωρίς να αυξηθεί η πιθανότητα εμφάνισης λάθους στον ανιχνευτή (δέκτη).

Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης με Τετραγωνισμό (QPSK)

Μια ενδιαφέρουσα περίπτωση των διαμορφώσεων φάσης πολλαπλών επιπέδων είναι η **διαμόρφωση μετατόπισης φάσης με τετραγωνισμό** (Quadrature PSK, QPSK), η οποία χρησιμοποιεί **τέσσερα σύμβολα ορθογωνικά μεταξύ τους**.

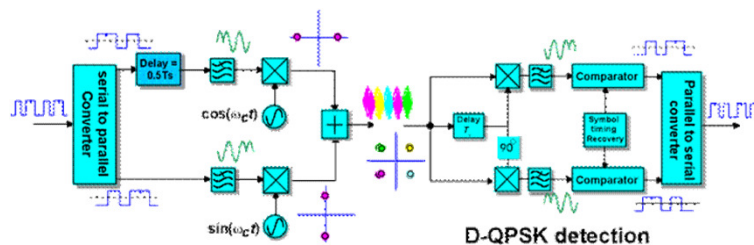
Το διάγραμμα αστερισμού της QPSK αποτελείται από ένα σύνολο **4 σημείων** πάνω σε ένα κύκλο ακτίνας A (=πλάτος φέροντος), τα οποία ισαπέχουν μεταξύ τους κατά γωνία $\pi/2$ rad. Οι καταστάσεις φάσεων είναι στραμμένες κατά 45° ως προς τους δύο άξονες $\cos(\omega_c t)$ και $\sin(\omega_c t)$.



Η QPSK λόγω της ορθογωνικότητας επιτυγχάνει **διπλάσια ταχύτητα** από την BPSK στο **ίδιο εύρος ζώνης** και χωρίς να υποβαθμίζεται η **απόδοση ανίχνευσης**.

Η **φασματική απόδοση** της QPSK είναι **διπλάσια** από της BPSK, δηλαδή είναι **$Q=2$ bit/sec/Hz**

Παραγωγή και λήψη σήματος QPSK



Διάγραμμα διαμορφωτή και ανιχνευτή QPSK

Διαμορφωτής QPSK

Τα δεδομένα εισόδου χωρίζονται σε **δύο ακολουθίες** (μία άρτια και μία περιττή), οι οποίες εμφανίζουν το ήμισυ του αρχικού ρυθμού.

Οι ακολουθίες φιλτράρονται και διαμορφώνουν κατά BPSK δύο **ορθογωνικά φέροντα** $\cos(\omega_c t)$ και $\sin(\omega_c t)$ τα οποία **αθροίζονται παράλληλα**.

Αποδιαμορφωτής QPSK

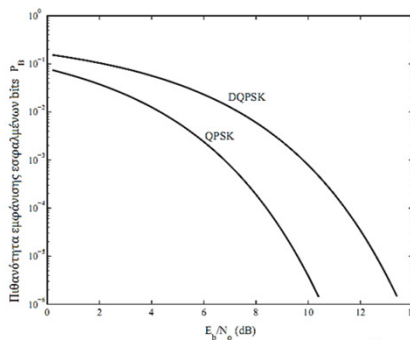
Το διαμορφωμένο σήμα:

- υφίσταται μίξη με τα δύο ορθογωνικά φέροντα τα οποία έχουν προηγουμένως ανακτηθεί.
- οδηγείται σε ένα συγκριτή προκειμένου να ανακτηθούν οι δύο ακολουθίες δεδομένων.
- Τα δεδομένα ανασυντίθενται σε μια ενιαία ακολουθία με τη χρήση κατάλληλου μετατροπέα.



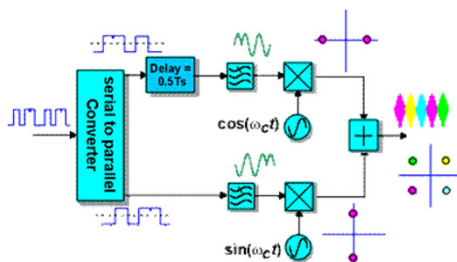
Διαφορική Διαμόρφωση QPSK (DQPSK)

- Για την άρση της αβεβαιότητας φάσης στην ανάκτηση του φέροντος στην QPSK χρησιμοποιούνται τεχνικές, όπως π.χ., τοποθέτηση προπομπών στην αρχή, η διαφορική κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση ή η από κοινού χρήση διαφορικής κωδικοποίησης και διαφορικής ανίχνευσης φάσης.
- Είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί **διαφορική αποδιαμόρφωση της QPSK**, αντί για την σύμφωνη ανίχνευση σε περιπτώσεις που το ζητούμενο είναι η απλή υλοποίηση του πομποδέκτη.
- Η απόδοση της DQPSK ως προς τον ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων είναι **σημαντικά υποδεέστερη** από της QPSK.
- Επιπλέον, η DQPSK δεν μοιράζεται την σπουδαία ιδιότητα της σύμφωνης QPSK, να μη ζημιώνεται η απόδοση σφάλματος όταν βελτιώνεται η φασματική απόδοση.
- Η DQPSK δεν προτιμάται γενικά στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.



Διαμόρφωση $\pi/4$ QPSK

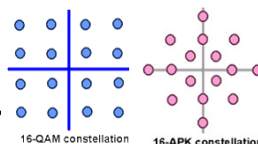
- Σε αυτή τη διαμόρφωση το σύνολο των 4 συμβόλων **περιστρέφεται κατά $\pi/4$ σε κάθε εκπομπή νέου συμβόλου**.
- Αυτό γίνεται για να διασφαλιστεί ότι η διαμορφωμένη περιβάλλουσα δεν θα διέλθει **ποτέ από το μηδέν**, ελαχιστοποιώντας έτσι το λόγο τιμής κορυφής προς την μέση τιμή της διαμόρφωσης.



Κύκλωμα παραγωγής $\pi/4$ -QPSK

Συνδυασμένη Διαμόρφωση Πλάτους και Φάσης QAM/APK

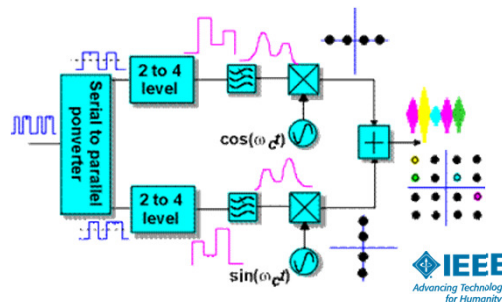
Συνδυάζοντας το **πλάτος και τη φάση συμβόλων** προκύπτει ένα είδος σύνθετης διαμόρφωσης που άλλοτε αποκαλείται **M-αδική σηματοδότηση APK** (Amplitude and Phase Keying) και άλλοτε **M-αδική σηματοδότηση QAM** (Quadrature Amplitude Modulation), ανάλογα με τους περιορισμούς στη σχέση πλάτους και φάσης.



Διαμορφωτής M-QAM

Η απλούστερη μορφή διαμόρφωσης QAM είναι στην πραγματικότητα το σύνολο συμβόλων της QPSK, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως δύο ορθογώνιοι (με διαφορά φάσης 90°) φορείς, διαμορφωμένοι κατά πλάτος, με στάθμες πλάτους $+A$ και $-A$.

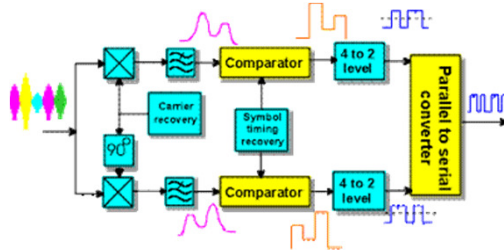
Αυξάνοντας τον αριθμό των σταθμών πλάτους κάθε φορά σε **τέσσερις**, για παράδειγμα $\pm A$ και $\pm 3A$, προκύπτουν **16 δυνατοί συνδυασμοί συμβόλων** στην έξοδο του πομπού, οι οποίοι απέχουν εξίσου στο διάγραμμα αστερισμού και αντιπροσωπεύονται από συγκεκριμένο πλάτος και φάση ο καθένας.



Συνδυασμένη Διαμόρφωση Πλάτους και Φάσης QAM/APK

Αποδιαμορφωτής M-QAM

Η διαμόρφωση QAM μπορεί να αποκωδικοποιηθεί είτε με σύμφωνη είτε με διαφορεικά σύμφωνη ανίχνευση, όπως η QPSK.



Για την ανίχνευση του σήματος M-QAM απαιτείται η ανάκτηση των ορθογωνικών φερόντων. Το πρόβλημα της **αβεβαιότητας φάσης** περιπλέκεται ακόμα περισσότερο επειδή στα δεδομένα υπάρχει πλέον και το στοιχείο του **πλάτους**.

Στην έξοδο κάθε ορθογωνικού αποδιαμορφωτή προκύπτουν τα σύμβολα βασικής ζώνης πολλαπλών επιπέδων, τα οποία θα πρέπει πριν αναγνωριστούν από το κύκλωμα ανίχνευσης του δέκτη να υποστούν προσαρμοσμένο φίλτράρισμα.



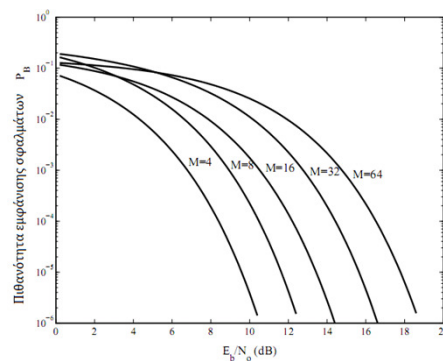
Χαρακτηριστικά μεγέθη M-QAM

Φασματική πυκνότητα ισχύος (Power Spectral Density – PSD) [f_c συχνότητα φέροντος]:

$$P(f) = \frac{mE_b}{2} \left\{ \left[\frac{\sin \pi (f - f_c) mT}{\pi (f - f_c) mT} \right]^2 + \left[\frac{\sin \pi (f + f_c) mT}{\pi (f + f_c) mT} \right]^2 \right\}$$

όπου E_b η ενέργεια ανά bit και m το πλήθος των bits/symbol ($M = 2^m$).

Φασματική Απόδοση: $Q = m \text{ bits/sec/Hz}$ - Αύξηση απόδοσης Q με την αύξηση των ομαδοποιημένων bits ανά σύμβολο, συνεπώς και με τον αριθμό των συμβόλων M .



Ρυθμός λήψης λανθασμένων συμβόλων P_S

$$P_S \leq 2 \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)}} \cdot \frac{E_b}{N_0} \right)$$

Πιθανότητα εμφάνισης λανθασμένων bits P_B

$$P_B = \frac{P_S}{\log_2 M}$$

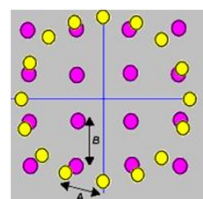
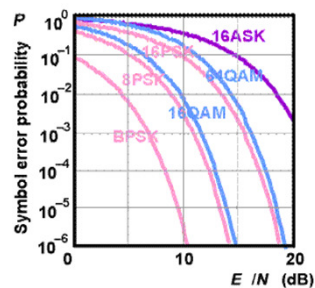


Σύγκριση PSK και QAM

Συγκρίνοντας τις καμπύλες πιθανότητας εμφάνισης σφάλματος για τις τεχνικές PSK και QAM, διαπιστώνεται το πλεονέκτημα της QAM έναντι της PSK, το οποίο είναι η **επιπλέον ανοχή στο θόρυβο κατά περίπου 3.5dB**, ανάμεσα στις 16-QAM και 16-PSK.

Η βελτίωση αυτή προκύπτει σε βάρος της σχεδίασης του αποδιαμορφωτή, καθώς η QAM απαιτεί **πιο περίπλοκα κυκλώματα**, ικανά να διαχειριστούν πληροφορία που μεταφέρεται στο πλάτος αλλά και στη φάση, και να αντιμετωπίσουν τα σφάλματα στο πλάτος και στη φάση που προκαλούνται στο κανάλι.

Στην πράξη, τα οφέλη λόγω της καλύτερης συμπεριφοράς αντισταθμίζουν την πολυπλοκότητα, και έτσι σήμερα η μέθοδος διαμόρφωσης QAM χρησιμοποιείται **πιο συχνά** από την PSK.



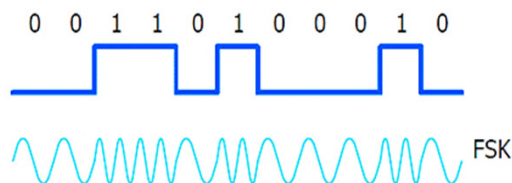
Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους - FSK

FSK	Frequency Shift Keying
BFSK	Binary FSK
MFSK	M/ary FSK
MSK	Minimum Shift Keying
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying

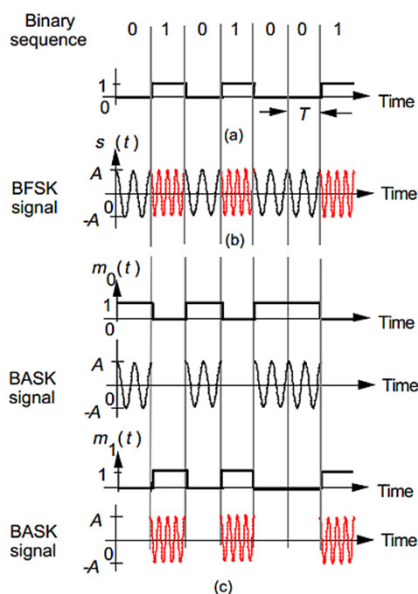
Ψηφιακή Διαμόρφωση Συχνότητας (FSK)

Στο FSK η **συχνότητα του φέροντος** μεταπηδά μεταξύ δύο (ή περισσότερων) τιμών, ανάλογα με την ψηφιακή πληροφορία. Συγκεκριμένα:

- Για bit = 1 στέλνουμε επί χρόνο T το σήμα $A \cos \omega_0 t$
- Για bit = 0 στέλνουμε επί χρόνο T το σήμα $A \cos \omega_1 t$



Μαθηματική περιγραφή BFSK



Σήμα BFSK

$$s(t) = \begin{cases} A \cos \omega_0 t & 0 \leq t \leq T \\ A \cos \omega_1 t & \text{αλλιού} \end{cases}$$

Ισχύει:

$$s(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos \omega_0 t & 0 \leq t \leq T \\ \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos \omega_1 t & \text{αλλιού} \end{cases}$$

όπου $E = P T$ η **ενέργεια** και $P = \frac{A^2}{2}$ η **ισχύς** ενός bit.

(a) Δυαδικό σήμα εισόδου

(b) Διαμορφωμένο κατά BFSK σήμα

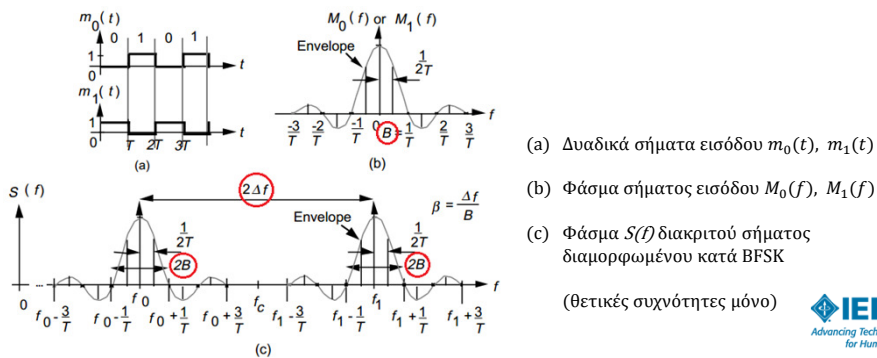
(c) Ανάλυση BFSK σε δύο BASK σήματα

Φάσμα κατά BFSK διαμορφωμένου σήματος

Ο Fourier του $s(t)$ είναι : $S(f) = \frac{A}{2} [M_0(f - f_0) + M_0(f + f_0)] + \frac{A}{2} [M_1(f - f_1) + M_1(f + f_1)]$

Ορίζοντας $\Delta f = f_1 - f_0$ έχουμε $s(t) = A \cos 2\pi(f_c t + \Delta f t)$, όπου f_c συχνότητα φορέα, $\Delta f = \beta B$ απόκλιση συχνότητας, β δείκτης διαμόρφωσης και $B = 1/T$ εύρος ζώνης του διαμορφωνόμενου σήματος.

- Όταν $\Delta f \gg 1/T$ έχουμε **ευρείας ζώνης** BFSK σήμα, με εύρος ζώνης $2\Delta f$
- Όταν $\Delta f \ll 1/T$ έχουμε **στενής ζώνης** BFSK σήμα, με εύρος ζώνης $2B$

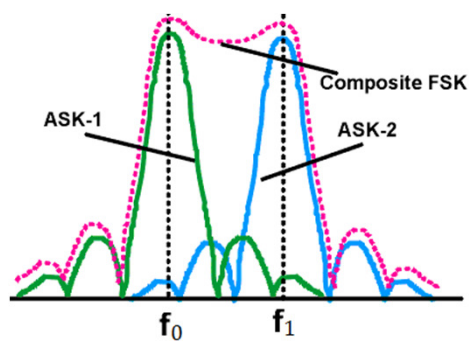


Φασματική πυκνότητα ισχύος σήματος BFSK

Φασματική πυκνότητα ισχύος (Power Spectral Density – PSD) [f_c συχνότητα φέροντος]:

$$P(f) = \frac{E_b}{8T} \left\{ \delta \left(f - f_c - \frac{1}{2T} \right) + \delta \left(f - f_c + \frac{1}{2T} \right) \right\} + \frac{2E_b}{\pi^2} \cdot \frac{\cos^2[\pi(f - f_c)T]}{[4((f - f_c)^2 T^2 - 1)]^2}$$

όπου E_b η ενέργεια ανά bit και m το πλήθος των bits/symbol ($M = 2^m$).

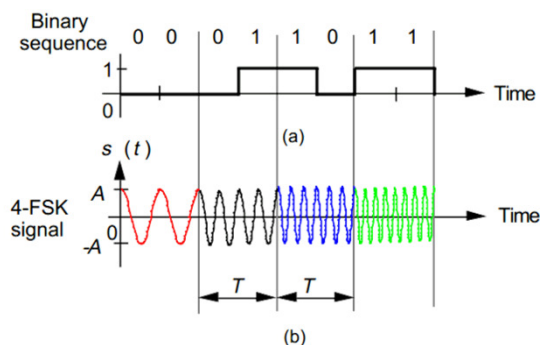


Μαθηματική περιγραφή MFSK

Σήμα MFSK

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_i t + \theta') & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases}$$

$i=0,1,\dots,M-1$. A σταθερά, f_i μεταδιδόμενες συχνότητες, θ' αρχική φάση

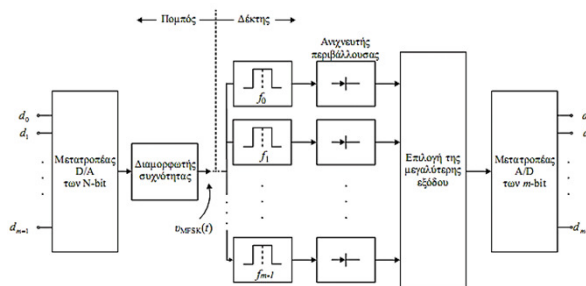


(a) Δυαδικό σήμα εισόδου, (b) Διαμορφωμένο κατά MFSK σήμα



Ψηφιακή Διαμόρφωση MFSK

- Η Μ-αδική διαμόρφωση FSK με ορθογώνια σηματοδοσία έχει **αυξημένη ανοχή στο θόρυβο**.
- Η απόδοσή της πλησιάζει το **όριο Shannon** για λειτουργία με τον ελάχιστο λόγο E_b/N_0 , δηλαδή **-1.59 dB**.
- Φασματική απόδοση $Q = \frac{R}{W} = 2 \cdot \frac{m}{M} \text{ bits/sec/Hz}$

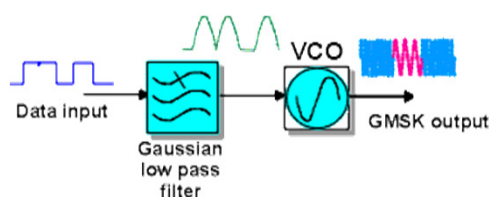


Κωδικοποιητής και ανιχνευτής MFSK



Διαμόρφωση Minimum Shift Keying (MSK)

- Επιδεικνύει πολύ καλή φασματική απόδοση προσεγγίζοντας την απόδοση της QPSK.
- Έχει αυξημένη πολυπλοκότητα στη μέθοδο δημιουργίας και ανίχνευσης συγκρινόμενη με απλούστερες μορφές FSK.
- Η εξαιρετική φασματική απόδοση της MSK μπορεί να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο με τη χρήση φίλτρων μορφοποίησης παλμού πριν από το διαμορφωτή.
- Προσθήκη ενός Gaussian filter που αποκόπτει την περιοχή εκτός του κυρίου λοβού της MSK, παράγει τη διαμόρφωση Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK).



Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της FSK

Πλεονεκτήματα FSK:

- Η διαμόρφωση FSK αποτελεί μια διαμόρφωση **σταθερής περιβάλλουσας** και επομένως είναι αναισθητή στις μεταβολές πλάτους (δηλαδή απολαβής) που συμβαίνουν στο κανάλι και συμβατή με συστήματα μη γραμμικών πομπών και δεκτών.
- Η ανίχνευση της FSK μπορεί να στηριχτεί στις **σχετικές μεταβολές συχνότητας** μεταξύ των καταστάσεων συμβόλων και επομένως δεν απαιτεί απόλυτη ακρίβεια των τιμών συχνοτήτων που διαδίδονται στο κανάλι.

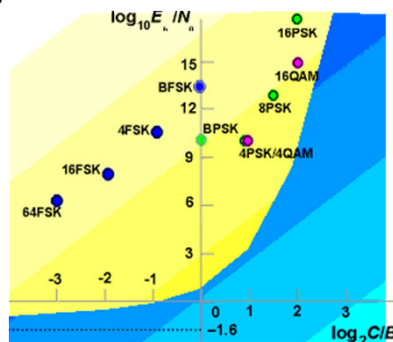
Άρα η FSK είναι σχετικά ανεκτική στην ολίσθηση συχνότητας του τοπικού ταλαντωτή και τη μετατόπιση Doppler.

Μειονεκτήματα FSK:

- Η FSK έχει σχετικά **μικρότερη απόδοση** εύρους ζώνης από τις ASK και PSK.
- Ο ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit και συμβόλων της FSK είναι **χειρότερος** από της PSK.

Σύγκριση Ψηφιακών Μεθόδων ως προς Όριο Shannon

- Κανένα από τα συστήματα Μ-αδικής διαμόρφωσης δεν μπορεί να πλησιάσει αρκετά κοντά στο όριο Shannon.
- Στις περισσότερες περιπτώσεις η απόσταση είναι $>4\text{dB}$.
- Για καλύτερη απόδοση, πρέπει να εισάγουμε επιπλέον κωδικοποίηση στα δεδομένα, ώστε να μπορούμε να ανιχνεύσουμε και να διορθώσουμε τα σφάλματα.
- **Τεχνικές κωδικοποίησης καναλιού FEC** (Forward Error Correction) υιοθετώντας **κωδικοποίηση block** (π.χ. Reed-Solomon σε εφαρμογές κινητών επικοινωνιών) ή **συνελκτική κωδικοποίηση** (π.χ. Viterbi στην ψηφιακή τηλεόραση), επιτυγχάνουν υψηλές αποδόσεις.
- Οι τεχνικές **συνδυασμένης κωδικοποίησης και διαμόρφωσης** π.χ. Trellis Coded Modulation – TCM) επιτρέπουν την επίτευξη κερδών κωδικοποίησης ($>6\text{dB}$), προσεγγίζοντας πλέον το όριο Shannon.



Προτεινόμενη Βιβλιογραφία

- «Ψηφιακές Επικοινωνίες», Andy Bateman, εκδόσεις Τζιόλα, 2000.
- «Ψηφιακά και Αναλογικά Συστήματα Επικοινωνίας», S.Shanmugam, εκδόσεις Πνευματικός
- «Αρχές Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων», Taub Herbert, Schilling Donald, εκδόσεις Τζιόλα, 2006.
- «Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα», Γ. Κοκκινάκης, εκδόσεις Συμμετρία, 2004
- «Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες» Τμήμα Πληροφορικής ΕΚΠΑ – <http://scr.bi/ItYf6D>
- «Ψηφιακές Διαμορφώσεις» – Μεταπτυχιακό πρόγραμμα Τμ. Φυσικής Παν. Πατρών – Αθ. Νασσιόπουλος <http://bit.ly/ItXl8z>
- «ELEC321 - Communication Systems», Electronic Engineering Dept, Macquarie University, Australia, <http://bit.ly/ItYazL>
- «Αποτίμηση, Αξιολόγηση, Κατάταξη Ψηφιακών Διαμορφώσεων» μεταπτυχιακή διατριβή Ελ. Στριβά, Δημοκρίτειο Παν. Θράκης, 2007
- Αναμόρφωση προγράμματος σπουδών ΤΕΙ Σερρών <http://bit.ly/ItXFpv>